

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Problem Image Mailbox.**

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-284136

(43)Date of publication of application : 13.10.2000

(51)Int.Cl.

G02B 6/13

(21)Application number : 11-137676

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP  
<NTT>

(22)Date of filing : 18.05.1999

(72)Inventor : ISHII TETSUYOSHI  
NOTOMI MASAYA  
TAMAMURA TOSHIAKI  
NOZAWA HIROSHI

(30)Priority

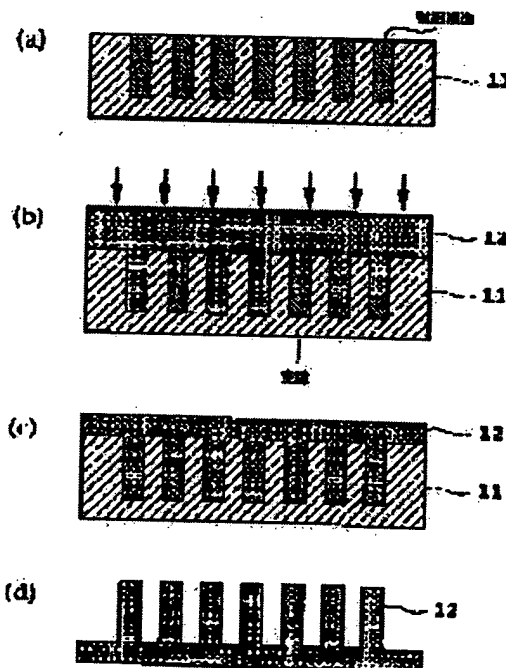
Priority number : 11020629 Priority date : 28.01.1999 Priority country : JP

## (54) PRODUCTION OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide the method of easily producing two-dimensional and three-dimensional photonic crystals while facilitating the introduction of inhomogeneous parts.

SOLUTION: This method of producing of the two-dimensional photonic crystal has a process for producing hyperfine structures in two-dimensional cyclic arrangement on a substrate 11, a process for forming a thin film of a material 12 with a refractive index  $n_1$  on the hyperfine structures, and a process for intruding the thin film into the hyperfine structure. By the method of producing the three-dimensional photonic crystal, a laminate body structure is formed by repeating at least once the process for forming a 1st thin film of a 1st material with the refractive index  $n_1$ , the process for processing a mold having specific hyperfine structures against the 1st thin film for imprinting, the process for laminating a 2nd thin film made of a 2nd material with the refractive index  $n_2$  on the 1st thin film, and the process for pressing the mold with specific hyperfine



structures against the 2nd thin film for imprinting.

---

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application  
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of  
rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-284136

(P2000-284136A)

(43)公開日 平成12年10月13日(2000.10.13)

(51)Int.Cl.

G 0 2 B 6/13

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

テーマコード(参考)

M 2 H 0 4 7

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 26 頁)

(21)出願番号 特願平11-137676

(22)出願日 平成11年5月18日(1999.5.18)

(31)優先権主張番号 特願平11-20629

(32)優先日 平成11年1月28日(1999.1.28)

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72)発明者 石井 哲好

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(72)発明者 納富 雅也

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(74)代理人 100077481

弁理士 谷 義一 (外1名)

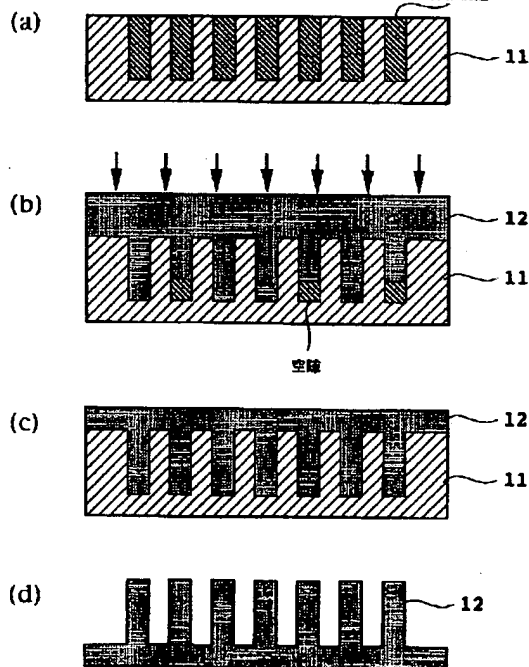
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 2次元および3次元フォトニック結晶の作製方法

(57)【要約】

【課題】 2次元および3次元フォトニック結晶の作製方法を提供。

【解決手段】 2次元フォトニック結晶の作製方法は、基板に周期的な2次元配置の微細構造を作製する工程と、屈折率 $n_1$ を有する材料からなる薄膜を該微細構造上に形成する工程と、該薄膜を該微細構造に押し込む工程とを有する。また、3次元フォトニック結晶の作製方法は、屈折率 $n_1$ を有する第1の材料からなる第1の薄膜を形成する工程と、該第1の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、第1の薄膜上に、屈折率 $n_2$ を有する第2の材料からなる第2の薄膜を積層する工程と、2の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、を少なくとも1回繰り返すことで積層体構造を形成することを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に薄膜が積層されてなる積層体構造を有するフォトニック結晶の作製方法であって、該基板に周期的な2次元配置の微細構造を作製する工程と、

屈折率 $n_1$ を有する材料からなる薄膜を該微細構造上に形成する工程と、

該薄膜を該微細構造に押し込む工程と、

を有することを特徴とする2次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項2】 基板上に薄膜が積層されてなる積層体構造を有するフォトニック結晶の作製方法であって、屈折率 $n_1$ を有する材料からなる薄膜を第1の基板上に形成する工程と、

第2の基板に周期的な2次元配置の微細構造を作製する工程と、前記第2の基板上の前記微細構造を前記第1の基板上の前記薄膜に押し込む工程と、

を有することを特徴とする2次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項3】 前記基板は、前記薄膜の屈折率よりも低い屈折率の材料を用いることを特徴とする請求項1または2に記載の2次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項4】 前記微細構造は、周期的な2次元配置の一部に非周期的部分を有することを特徴とする請求項1ないし3のいずれか一項に記載の2次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項5】 前記基板を削除する後工程を、さらに有することを特徴とする請求項1ないし4のいずれか一項に記載の2次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項6】 基板上に複数の薄膜が積層されてなる積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製方法であって、

屈折率 $n_1$ を有する第1の材料からなる第1の薄膜を形成する工程と、

該第1の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、

前記刻印が施された前記第1の薄膜上に、屈折率 $n_2$ を有する第2の材料からなる第2の薄膜を積層する工程と、

該第2の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、

を少なくとも1回繰り返すことで前記積層体構造を形成することを特徴とする3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項7】 前記第1の薄膜または前記第2の薄膜のいずれか一方を除去する工程を、さらに有することを特徴とする請求項6に記載の3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項8】 基板上に複数の薄膜が積層されてなる積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製方法であって、

あって、

屈折率 $n_1$ を有する第1の材料からなる第1の薄膜を形成し、さらに該第1の薄膜の上に屈折率 $n_2$ を有する第2の材料からなる第2の薄膜を積層する工程を少なくとも1回繰り返すことで前記第1の薄膜と前記第2の薄膜とが交互に積層された交互積層体構造を形成する工程と、

前記交互積層体構造に対して所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、

を有することを特徴とする3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項9】 前記第1の薄膜または前記第2の薄膜のいずれか一方を除去する工程を、さらに有することを特徴とする請求項8に記載の3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項10】 前記所定の微細構造は、周期的な2次元配置の微細構造を用いることを特徴とする請求項6ないし9のいずれか一項に記載の3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項11】 前記所定の微細構造は、周期的な2次元配置の一部に非周期的部分を有することを特徴とする請求項6ないし9のいずれか一項に記載の3次元フォトニック結晶の作製方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光導波路や共振器等の光素子として適用可能な2次元および3次元フォトニック結晶を作製する方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】フォトニック結晶は、屈折率が異なる物質が周期的に配設された周期構造物であり、物質間の屈折率が大きくなると多重反射に基づいてフォトニックバンドギャップと呼ばれる光の伝搬を禁止する周波数帯が現れる。したがって、周期構造中に周期を乱す不均一部分を導入すればその部分に光が閉じこめられるので光導波路や共振器としてフォトニック結晶を適用することが可能となる。そのため、3次元の周期構造を有するフォトニック結晶（以下、3次元フォトニック結晶ともいう）に不均一部分を導入することで、より一層高い光の閉じ込め効果が達成されることから、超微小立体光回路や超低しきい値レーザー等の高性能な光デバイスの実現が期待される。

【0003】従来の3次元フォトニック結晶の作製方法としては、以下に示すものが報告されている。

【0004】(1)ドライエッチングを利用した方法 (C.C. Cheng et al., J. Vac. Sci. Technol., B. vol. 13, no. 6, pp. 2696-2700, 1995)

本方法では、ガリウム砒素のような屈折率の高い基板にドライエッチングで穴をあける。その際、基板の面に対して垂直な軸から約35度の傾きで120度ずつ3方向

から穴をあける。この方法では、ダイヤモンド構造に近い周期構造が得られ、全方向に対してフォトニックバンドギャップが形成されることが理論的に示されている。

【0005】(2) X線リソグラフィを利用した方法  
(G. Feiertag, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 71, no. 11, pp. 1441-1443)

本法は、X線リソグラフィを適用し、上記(1)の方法と同様に、ダイヤモンド構造を得る方法である。X線を硬化型の感光性樹脂に(1)の方法と同様な方向から照射して硬化させ、現像によって(1)の方法の穴に相当する部分を残してフォトニック結晶を作製するものである。

【0006】(3) 微小球の自己配列を利用した方法  
(H. Miguez, et al., Appl. Phys. Lett. vol. 71, no. 9, pp. 1148-1150, 1997)

本法は、球径のそろった二酸化シリコンの微粒子をコロイド状分散液から3次元方向に規則正しく成長・配列させフォトニック結晶を形成するものである。

【0007】(4) ボンディングを利用した方法(S. Noda et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, pp. L909-912, 1996)

本法は、基板上に形成した高屈折率薄膜に対してリソグラフィとドライエッチングとにより2次元周期構造を作製した後、基板同士の反転融着(周期構造同士の融着)・基板不要部除去を繰り返し、2次元周期構造を積層して3次元フォトニック結晶を形成するものである。

【0008】(5) 一層ごとの微細加工を利用した方法  
(K. A. McIntosh, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 70, no. 22, pp. 2937-2939)

本法は、一層ごとに薄膜形成、リソグラフィ、ドライエッチングを行い2次元周期構造を作製し、それを繰り返すことにより3次元的に積層してフォトニック結晶を形成するものである。

【0009】(6) 多層膜バイアススパッタ法を利用した方法(川上他、信学論、C-I, vol. j80-C-I, no. 6, pp. 296-299, 1997)

本法は、基板上にあらかじめ微細構造を形成し、シリコンと二酸化炭素とをその基板上に交互に積層していくもので、バイアススパッタ法を適用することにより基板上の微細構造を反映した3次元フォトニック結晶が形成される。

【0010】上記(3)から(6)の方法は、屈折率の大きい微小体積要素を屈折率の小さい媒質中に面心立方構造状に配置して結晶を得るもので、フォトニックバンド効果が発現することが理論的かつ実験的に示されている。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上記従来の作製方法については、以下のような解決すべき課題がある。

【0012】まず、上記(1)～(3)の方法については、フォトニック結晶の作製は可能であるが、該結晶中に周期構造を乱す不均一部分を導入することは技術的に困難で、実用的なデバイス作製には適していない。

【0013】つぎに、上記(4)の方法は、2次元周期構造作製時に周期の不均一部分の導入が可能で、デバイス作製上の点から有望とみられるが、2次元周期構造を積層する際に一層ごとにリソグラフィ、ドライエッチング、ウェハ融着のプロセスが必要で、作製プロセスが煩雑で、かつ時間がかかるため、多量の基板を処理する上で実用上問題がある。

【0014】また、上記(5)の方法についても、上記(4)の方法と同様に3次元周期構造中に不均一部分を導入することが可能であるが、一層ごとに薄膜形成、リソグラフィ、ドライエッチングの3プロセスが必要となり作製時間に問題がある。

【0015】さらに、上記(6)の方法は、作製プロセスが単純で、材料もシリコンと二酸化シリコンとの組み合わせということから、現在最も有望視されているものであるが、周期構造中への不純物の導入において、積層方向(基板に垂直な方向)には容易であるが、水平方向(基板に水平な方向)には、それほど容易ではないという問題がある。

【0016】したがって、本発明の目的は上記課題を解決し、不均一部分を導入することが容易で、かつ製造が容易な2次元および3次元フォトニック結晶の作製方法を提供することである。

【0017】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、請求項1に記載の発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法は、基板上に薄膜が積層されてなる積層体構造を有するフォトニック結晶の作製方法であって、該基板に周期的な2次元配置の微細構造を作製する工程と、屈折率 $n_1$ を有する材料(第1の屈折率を有する材料)からなる薄膜を該微細構造上に形成する工程と、該薄膜を該微細構造に押し込む工程と、を有することを特徴とする。

【0018】また、請求項2に記載の発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法は、基板上に薄膜が積層されてなる積層体構造を有するフォトニック結晶の作製方法であって、屈折率 $n_1$ を有する材料からなる薄膜を第1の基板上に形成する工程と、第2の基板に周期的な2次元配置の微細構造を作製する工程と、前記第2の基板上の前記微細構造を前記第1の基板上の前記薄膜に押し込む工程とを有することを特徴とする。

【0019】上記したいずれかの2次元フォトニック結晶の作製方法において、基板は薄膜の屈折率よりも低い屈折率の材料を用いることが好ましい。また、微細構造は、周期的な2次元配置の一部に非周期的部分を有することが好ましい。2次元フォトニック結晶の作製方法

は、さらに基板を削除する後工程を有するようにしてもよい。

【0020】請求項6に記載の発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法は、基板上に複数の薄膜が積層されてなる積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製方法であって、屈折率 $n_1$ を有する第1の材料からなる第1の薄膜を形成する工程と、該第1の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程と、前記刻印が施された前記第1の薄膜上に、屈折率 $n_2$ を有する第2の材料（第2の屈折率を有する材料）からなる第2の薄膜を積層する工程と、該第2の薄膜に所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程とを少なくとも1回繰り返すことで前記積層体構造を形成することを特徴とする。好ましくは、前記第1の薄膜または前記第2の薄膜のいずれか一方を除去する工程を、さらに有する。

【0021】請求項8に記載の発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法は、基板上に複数の薄膜が積層されてなる積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製方法であって、屈折率 $n_1$ を有する第1の材料からなる第1の薄膜を形成し、さらに該第1の薄膜の上に屈折率 $n_2$ を有する第2の材料からなる第2の薄膜を積層する工程を少なくとも1回繰り返すことで前記第1の薄膜と前記第2の薄膜とが交互に積層された交互積層体構造を形成する工程と、前記交互積層体構造に対して所定の微細構造を有する型を押し当てて刻印する工程とを有することを特徴とする。好ましくは、前記第1の薄膜または前記第2の薄膜のいずれか一方を除去する工程を、さらに有することを特徴とする。好ましくは、前記所定の微細構造は、周期的な2次元配置の微細構造を用いる。好ましくは、所定の微細構造は、周期的な2次元配置の一部に非周期的部分を有する。

【0022】上記第1あるいは第2の屈折率を有する材料は、いずれかが酸化物あるいは酸化物複合材料からなる。

【0023】酸化物あるいは酸化物複合材料としては、チタン、ケイ素、水素、リチウム、ナトリウム、カリウム、ルビジウム、セシウム、ベリリウム、マグネシウム、カルシウム、ストロンチウム、バリウム、セリウム、ジルコニウム、バナジウム、ニオブ、タンタル、クロム、モリブデン、タングステン、マンガン、鉄、ルテチウム、オスミウム、コバルト、ニッケル、パラジウム、白金、銅、銀、金、亜鉛、カドミウム、ホウ素、アルミニウム、ガリウム、インジウム、タリウム、炭素、ゲルマニウム、スズ、鉛、窒素、リン、ヒ素、アンチモン、ビスマス、イオウ、セレン、テルル、フッ素、塩素、臭素、ヨウ素等の元素を一種類あるいは複数含むものが使用可能である。上記元素を含む酸化物あるいは酸化物複合材料は、一般に屈折率が1.3~3.0の範囲にあることが知られており、できるだけ屈折率差が大き

くなるように第1あるいは第2の屈折率を有する材料として用いることが好ましい。

【0024】また、第1または第2の屈折率を有する材料は、いずれかが有機高分子材料である。該有機高分子材料としてはポリイミドや感光性樹脂が挙げられる。

【0025】

【発明の実施の形態】<2次元フォトニック結晶の作製方法>以下、本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の実施形態例を図面を参照しながら詳細に説明する。図中に示す参照符号は、異なる図面間であっても同一符号は同一構成要素を示すものとする。

【0026】〔第1の実施形態例〕図1は、本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法の一例を説明するためのもので、図1の(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式的断面図である。また、図5、図7はそのような作製法で使用される2次元の均一周期構造を有する構造体の例の模式的斜視図である。図1

(a)において、該構造体14（図5）あるいは構造体15（図7）は2次元方向に沿って周期的な凹凸構造が形成された一面（該面から垂直な方向からみて格子状に形成された凹凸構造）を有する。まずはじめに、図1

(a)に示すように2次元の均一周期構造を有する構造体11（図5、図7参照）を作製する。その後、上記構造体11上に屈折率 $n_1$ を有する材料12の薄膜を形成する。この薄膜形成時に前記構造体11の微細構造中にも前記屈折率 $n_1$ の材料12が埋め込まれるが微細構造が深い場合には、通常、完全には埋め込まれないで図1(b)のように空隙等が発生する。そこで埋め込みを完全にするために、前記薄膜形成後、適当な外力により該薄膜を均一に微細構造中に押し込む（図1(b)）。この時、屈折率 $n_1$ を有する材料12は圧縮され密度が増大して、一般には、屈折率が増大し、該構造体との屈折率差が大きくなるためフォトニック結晶作製上有利となる。上述の2工程により、上記構造体11が仮に屈折率 $n_0$ の材料から構成されていれば、屈折率 $n_0$ の材料中に屈折率 $n_1$ の材料が2次元、かつ周期的に配置された構造となり2次元フォトニック結晶が作製される（図1(c)）。さらに図1(c)において、前記構造体11を除去すれば、空气中（屈折率約1）に屈折率 $n_1$ の材料が2次元、かつ周期的に配置された構造のフォトニック結晶が得られる（図1(d)）。この場合、空気屈折率が約1であることから屈折率差が大きくなることが、また構造的には屈折率、光透過度等の光学特性とは無関係に使用可能となるので材料の選択の余地が広がる等の利点がある。またこの場合、構造体12を型として用い繰り返し使用することが好ましい。図5あるいは図7で示した2次元均一周期の微細構造を有する構造体を用い、屈折率 $n_1$ を有する材料を埋め込んだ後除去することにより得られた2次元フォトニック結晶例を図6あるいは図8に示す。図5と図7の構造体は微細構造バ

タンが反転されており（図5の構造体14の凹部が図7の構造体15の凸部に対応）、作製されたフォトニック結晶も互いに反転したものが得られる。フォトニック結晶としての機能は、いずれも光のフィルタ作用を示す。すなわち、ある波長の光はフォトニック結晶の周期構造と屈折率差にもとづき透過可能であるが他の波長の光は透過不能となる（図6、図8において、それぞれ波長1、波長2の光）。

【0027】つぎに、2次元周期構造体中に、周期を乱す不均一な部分を導入する方法について説明する。不均一部分を導入するためには、図1の工程（a）において、2次元の微細周期構造を有する構造体11の一部に不均一部分が設けられたものを使用する。そのような不均一部分が設けられた構造体の例を図9、図11、図13あるいは15に示す。図9は2次元周期構造体の一部の凹部が埋められて2次元周期構造の一部に不均一部分が設けられている。すなわち、構造体16は上から見て一つのT字と二つのL字が結合した、いわゆる音叉型の凸部が不均一部分として存在する構造となる。このような構造体16によって作製された屈折率 $n_1$ を有する材料12からなる2次元フォトニック結晶の模式的斜視を図10に示す（図では構造体16の除去後を示す）。この例の2次元フォトニック結晶では、光のT字型分岐と90度屈曲を可能とする導波路が作製できる。一方、図11の例は、図9の構造体16とはボタンが反転した構造を有する構造体17で音叉型に凸部が欠落して不均一部分が形成されている。この構造体17を用いて作製されたフォトニック結晶例を図12に示す。フォトニック結晶としての機能は図10と同等となる。さらに、図13は一部の凹部を円状に埋め込み不均一部分を導入した例の構造体18で、これを用いて作製された2次元フォトニック結晶例を図14に示す。この場合には屈折率 $n_1$ を有する材料12の2次元微細構造と平行な方向に光の閉じ込め（光の導波）が可能となる。また図15の構造体19は、図9と図11の関係と同様に、図13の構造体18と相反的なボタン関係にあり、フォトニック結晶の機能は図14と同様に2次元微細構造と平行な方向への光の閉じ込め（光の導波）となる（図16）。

【0028】2次元の微細構造を有する構造体の作製には半導体リソグラフィ技術ならびに微細加工技術の適用が可能である。リソグラフィの手段としては、紫外線、電子線、X線を利用することができる。また簡便な方法としては、近年開発された、型押し法を利用した陽極酸化法が上げられる（H. Masuda, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 71, no. 19, pp. 2770-2772, 1997）。本手法では、アルミニウム基板等にはじめに所定の微細構造を有した型を押して該基板表面に微細パタンの窪みを形成した後陽極酸化を行う。この時窪みが開始点となって酸化が進み前記の型の微細構造が反映されるため、高配列

化された微細構造がアルミニウム基板に作製可能となる。

【0029】また構造体11は図1（a）で示したように単一基板に2次元の微細構造が加工された一体型の構造体でもよいし、また図3に示すように微細構造が基板を貫通した形態であってもよい。あるいはまた図4のように、貫通基板11aと平板11bとから構成されているものでもよい。

【0030】上述の構造体への屈折率 $n_1$ を有する材料の薄膜形成は、スパッタ法、真空蒸着法、化学的気相成長法等の適用が可能であるが、プロセス簡略化の点から、ゾルーゲル法を用いた回転塗布法が最も好ましい。ゾルーゲル法は、例えば、作花済夫著「ゾルーゲル法の応用」（アグネ承風社刊、1997年）に詳述されているように、あらかじめ調整された薄膜原料の溶液あるいは分散液に熱や光を当てて化学反応を引き起こして固化させるものである。この方法では出発材料が液体であるため、回転塗布によって、また比較的低温でガラス材料をはじめとして種々の複合材料の薄膜を形成できること等の利点がある。また、成分・作製プロセスを適当に制御することによって、柔らかい薄膜が得られるため、適当な外力によりその薄膜を微細構造体中に押し込むことが可能となる。

【0031】さらに、図1（d）で得られる屈折率 $n_1$ を有する材料からなる2次元微細構造体が強度不足等により取り扱いが困難な場合には、それを支持するような基板を設け、第2の実施形態で示す図2（c）の形態としてもよい。

【0032】〔第2の実施形態例〕図2は本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法の第2の例を説明するためのもので、図2の（a）ないし（c）は各工程を説明するための模式的断面図である。

【0033】以下、本実施形態例の2次元フォトニック結晶の作製法について説明する。

【0034】まずはじめに、基板13上に屈折率 $n_1$ を有する材料12の薄膜を形成する（図2（a））。つぎに、第1の実施形態と同様の2次元の均一な周期構造を有する構造体4（図5）あるいは構造体15（図7）を作製し、前記薄膜に押し付け該構造体中に前記材料12を埋め込む（図2（b））。この2工程により、上記構造体11が屈折率 $n_0$ の材料から構成されていれば、屈折率 $n_0$ の材料中に屈折率 $n_1$ の材料が2次元的、かつ周期的に配置された構造となり2次元フォトニック結晶が作製される。さらに図2（b）において、前記構造体11を除去すれば、空气中（屈折率約1）に屈折率 $n_1$ の材料が2次元的、かつ周期的に配置された構造のフォトニック結晶が得られる（図2（c））。この場合、空気の屈折率が約1であることから屈折率差が大ききことができること、また構造体12は屈折率、光透過度等の光学特性とは無関係に使用可能となるので材料の選択の余地が



広がる等の利点があること、さらに、構造体12を型として用い繰り返し使用することが好ましいこと、は第1の実施形態例で述べたとおりである。

【0035】本実施形態においても2次元周期構造体中への不均一部分の導入は第1の実施形態と同様に行うことができる。すなわち、2次元均一周期構造を有する構造体14(図5)や15(図7)などの替わりに均一周期構造中に不均一部分を有する構造体16~19(図9, 図11, 図13, 図15)などを使用すればよい。フォトニック結晶の機能もそれぞれ第1の実施形態と同様なものが得られる。

【0036】また作製工程も第1の実施形態に準じて行うことができる。ただし、本実施形態では、屈折率 $n_1$ を有する材料2の薄膜に構造体11を押し付け該構造体中に埋め込むため、押し付ける対象が第1の実施形態とは逆になる。また埋め込み工程を容易にするため前記材料12を加熱し軟化させながら行うことが好ましい。

【0037】上記第1ないし第2の実施形態のいずれかの方法にもとづいて2次元フォトニック結晶を具体的に作製した例を以下に示す。

【0038】[実施例1] 第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0039】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板(屈折率約1.4)と屈折率 $n_1$ を有する材料として酸化チタン複合材料(屈折率約2.5)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0040】まず、二酸化シリコン基板上にクロム薄膜を形成しレジストを回転塗布し熱処理した。つぎに、レジストを電子ビームで露光し現像して0.8 $\mu$ m周期の微細構造パターン(0.4 $\mu$ m角正方形パターン、パターン領域2mm)を形成した。この電子ビーム露光では図5, 図7, 図9, 図11, 図13, 図15で示した6種の構造体の微細構造を一枚の二酸化シリコン基板上に露光した。つぎに、ハロゲン元素を含むガスをを用いた反応性ドライエッチングにより上記レジストパターンをマスクとして上記クロム薄膜をエッチングした。つぎに、該クロム薄膜パターンをマスクにハロゲン元素を含むガスを用いた二酸化シリコン基板を深さ2 $\mu$ mエッチングするより、2次元微細構造を有する二酸化シリコン構造体を作製した。

【0041】つぎに、前記二酸化シリコン構造体上に酸化チタン複合材料溶液を回転塗布し二酸化シリコンの微細構造上に前記酸化チタン複合材料の薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記酸化チタン複合材料膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行い酸化チタン複合材料膜を固化した。これにより、二酸化シリコン基

板中に配置された酸化チタン複合材料の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0042】[実施例2] 第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0043】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工したレジスト薄膜と屈折率 $n_1$ を有する材料として酸化チタン複合材料(屈折率約2.5)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0044】まず、シリコン基板上にフォトレジストを1 $\mu$ m回転塗布し熱処理後、紫外線縮小投影露光装置であらかじめ作製したマスクを介して露光し、現像して0.8 $\mu$ m周期構造パターン(0.4 $\mu$ m角正方形、パターン領域2mm)を形成した。この露光では図5, 図7, 図9, 図11, 図13, 図15で示した6種の構造体の微細構造を一括露光し、現像してレジストパターンを形成した。これにより2次元微細構造を有するレジスト構造体を作製した。つぎに、前記レジストパターンを紫外線硬化させた後、前記レジストの微細構造体上に酸化チタン複合材料溶液を回転塗布しレジストの微細構造上に前記酸化チタン複合材料の薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記酸化チタン複合材料膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行い酸化チタン複合材料膜を固化した。熱処理中に構造体であるレジストは一部分解して消失するが、さらに、レジストエッチング液を用いてレジストを完全に除去した。これにより酸化チタン複合材料の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0045】[実施例3] 第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0046】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料として酸化チタン複合材料(屈折率約2.5)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0047】まず、アルミニウム基板を第1の実施形態例で述べた高配列化陽極酸化法により、0.8 $\mu$ m周期構造パターン(0.4 $\mu$ m六角形、パターン領域2mm)を形成した。またパターン深さは5 $\mu$ mとした。この時アルミ基板の型押しに使用する型を適当に加工することにより図5, 図9, 図13で示した3種の構造体の微細構造を一枚のアルミニウム基板に作り込み、2次元の微細構造を有するアルミニウム構造体を作製した。つぎに、前記アルミニウム構造体上に酸化チタンを複合材料溶液を回転塗布しアルミニウム構造体の微細構造上に前記酸化

チタン複合材料の薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記酸化チタン複合材料膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行い酸化チタン複合材料膜を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、酸化チタン複合材料の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0048】[実施例4]第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0049】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板(屈折率約1.4)と屈折率 $n_1$ を有する材料としてチタン酸ジルコン酸鉛(以下、PZTと呼ぶ。屈折率約2.6)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0050】まず、二酸化シリコン基板上にクロム薄膜を蒸着しレジストを回転塗布し熱処理した。つぎに、レジストを電子ビームで露光し現像して $0.8\mu\text{m}$ 周期の微細構造パターン( $0.4\mu\text{m}$ 角正方形、パターン領域 $2\text{mm}$ )を形成した。この電子ビーム露光では図5、図7、図9、図11、図13、図15で示した6種の構造体の微細構造を一枚の二酸化シリコン基板上に露光した。つぎに、ハロゲン元素を含むガスをを用いた反応性ドライエッチングにより上記レジストパターンをマスクとして上記クロム薄膜をエッチングした。つぎに、該クロム薄膜パターンをマスクにハロゲン元素を含むガスを用いた二酸化シリコン基板を深さ $2\mu\text{m}$ エッチングするより、2次元微細構造を有する二酸化シリコン構造体を作製した。

【0051】その後、前記二酸化シリコン構造体上にPZT溶液を回転塗布し二酸化シリコンの微細構造上に前記PZTの薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記PZT膜を平板を用いて、均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行いPZT膜を固化した。これにより、二酸化シリコン基板中に配置されたPZTの2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0052】[実施例5]第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0053】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工したレジスト薄膜と屈折率 $n_1$ を有する材料としてPZT(屈折率約2.6)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0054】まず、シリコン基板上にフォトレジストを $1\mu\text{m}$ 回転塗布し熱処理後、紫外線縮小投影露光装置であらかじめ作製したマスクを介して露光し、現像して $0.8\mu\text{m}$ 周期構造パターン( $0.4\mu\text{m}$ 角正方形、パタ

ン領域 $2\text{mm}$ )を形成した。この露光では図5、図7、図9、図11、図13、図15で示した6種の構造体の微細構造を一括露光し、現像してレジストパターンを形成した。これにより2次元微細構造を有するレジスト構造体を作製した。つぎに、前記レジストパターンを紫外線硬化させた後、前記レジストの微細構造体上にPZT溶液を回転塗布しレジストの微細構造上に前記PZTの薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記PZT膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行いPZT膜を固化した。熱処理中に構造体であるレジストは一部分解して消失するが、さらに、レジストエッチング液を用いてレジストを完全に除去した。これによりPZTの2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0055】[実施例6]第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0056】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料としてPZT(屈折率約2.6)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0057】まず、実施例3と同様にして、アルミニウム基板上に $0.8\mu\text{m}$ 周期構造パターン( $0.4\mu\text{m}$ 六角形、パターン領域 $2\text{mm}$ )を形成した。またパターン深さは $5\mu\text{m}$ とした。この時アルミ基板の型押しに使用する型を適当に加工することにより図5、9、13で示した3種の構造体の微細構造を一枚のアルミニウム基板上に作り込み、2次元の微細構造を有するアルミニウム構造体を作製した。つぎに、前記アルミニウム構造体上にPZT溶液を回転塗布しアルミニウム構造体の微細構造上にPZTの薄膜を形成した。その後、熱処理を行った後、前記PZT膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実なものとした。その後、熱処理を行いPZT膜を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、PZTの2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0058】[実施例7]第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0059】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板(屈折率1.4)と屈折率 $n_1$ を有する材料としてカルコゲナイトガラスの一種であるセレン化ヒ素(屈折率約2.9、軟化点約 $200^\circ\text{C}$ )を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0060】まず、実施例1で述べた方法で二酸化シリ

コン基板に2次元微細構造を加工し、図5、図7、図9、図11、図13、図15で示した6種の微細構造を含む二酸化シリコン構造体を作製した。つぎに、前記二酸化シリコン構造体上にスパッタ法によりセレン化ヒ素の薄膜を形成した。つぎに、加熱しながら前記セレン化ヒ素膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実にものとした。その後、熱処理を行いセレン化ヒ素膜を固化した。これにより、二酸化シリコン基板中に配置されたセレン化ヒ素の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0061】本実施例では、カルコゲナイドガラスとして導波路等の作製に実績のあるセレン化ヒ素を用いたが、本特許のカルコゲナイド化合物は該ガラスのみに限られたものではなく、赤外線領域に光透過性を示し、高屈折率性と軟化点の低いものであれば、同様に適用可能である。

【0062】【実施例8】第1の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0063】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料としてカルコゲナイドガラスの一種であるセレン化ヒ素（屈折率約2.9）を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0064】まず、実施例3で述べた方法でアルミニウム基板に2次元微細構造を加工し、図5、図9、図13で示した3種の微細構造を含むアルミニウム構造体を作製した。つぎに、前記アルミニウム構造体上にスパッタ法によりセレン化ヒ素の薄膜を形成した。つぎに、加熱しながら前記セレン化ヒ素膜を平板を用いて均一に押し込み微細構造中への埋め込みを確実にものとした。その後、熱処理を行いセレン化ヒ素を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、セレン化ヒ素の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0065】【実施例9】第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0066】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板（屈折率約1.4）と屈折率 $n_1$ を有する材料として酸化チタン複合材料（屈折率約2.5）を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0067】まず、二酸化シリコン基板上に酸化チタン複合材料溶液を回転塗布し熱処理して酸化チタン複合材料の薄膜を形成した。つぎに、実施例1で述べた方法で作製した二酸化シリコン構造体を前記二酸化チタン複合材料薄膜に押し込み二酸化シリコン構造体の微細構造中

に二酸化チタン複合材料を埋め込んだ。その後、熱処理を行い二酸化チタン複合材料膜を固化した。これにより、二酸化シリコン基板中に配置された二酸化チタン複合材料の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0068】【実施例10】第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0069】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料として酸化チタン複合材料（屈折率約2.7）を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0070】まず、二酸化シリコン基板上に酸化チタン複合材料溶液を回転塗布し熱処理して酸化チタン複合材料の薄膜を形成した。つぎに、実施例3で述べた方法で作製したアルミニウム構造体を前記二酸化チタン複合材料薄膜に押し込み、アルミニウム構造体の微細構造中に二酸化チタン複合材料を埋め込んだ。その後、熱処理を行い二酸化チタン複合材料膜を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、酸化チタン複合材料の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0071】【実施例11】第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0072】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板（屈折率約1.4）と屈折率 $n_1$ を有する材料としてPZT（屈折率約2.6）を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0073】まず、二酸化シリコン基板上にPZT溶液を回転塗布し熱処理してPZTの薄膜を形成した。つぎに、実施例1で述べた方法で作製した二酸化シリコン構造体を前記PZT膜に押し込み二酸化シリコン構造体の微細構造中にPZTを埋め込んだ。その後、熱処理を行いPZT膜を固化した。これにより、二酸化シリコン基板中に配置されたPZTの2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0074】【実施例12】第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0075】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料としてPZT（屈折率約2.6）を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0076】まず、二酸化シリコン基板上にPZT溶液

を回転塗布し熱処理してPZTの薄膜を形成した。つぎに、実施例3で述べた方法で作製したアルミニウム構造体を前記PZT膜に押し込みアルミニウム構造体の微細構造中にPZTを埋め込んだ。その後、熱処理を行いPZT膜を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、PZTの2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0077】[実施例13] 第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0078】ここでは、2次元微細構造を有する構造体としてリソグラフィ技術を用いて微細加工した二酸化シリコン基板(屈折率約1.4)と屈折率 $n_1$ を有する材料としてカルコゲナイドガラスの一種であるセレン化ヒ素(屈折率約2.9)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0079】まず、二酸化シリコン基板上にスパッタ法によりセレン化ヒ素の薄膜を形成する。つぎに、実施例1で述べた方法で作製した二酸化シリコン構造体を前記セレン化ヒ素薄膜、該薄膜を加熱しながら押し付け二酸化シリコン構造体の微細構造中にセレン化ヒ素を埋め込んだ。その後、熱処理を行いセレン化ヒ素を固化した。これにより、二酸化シリコン基板中に配置されたセレン化ヒ素の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0080】[実施例14] 第2の実施形態例にもとづく作製方法による2次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0081】ここでは、2次元微細構造を有する構造体として陽極酸化法を用いて微細構造を作製したアルミニウム基板と屈折率 $n_1$ を有する材料としてカルコゲナイドガラスの一種であるセレン化ヒ素(屈折率約2.9)を用い、2次元均一周期構造、および不均一部分を含む2次元周期構造を作製した。

【0082】まず、二酸化シリコン基板上にスパッタ法によりセレン化ヒ素の薄膜を形成する。つぎに、実施例3で述べた方法で作製したアルミニウム構造体を前記セレン化ヒ素薄膜に、該薄膜を加熱しながら押し付け二酸化シリコン構造体の微細構造中にセレン化ヒ素を埋め込んだ。その後、熱処理を行いセレン化ヒ素を固化した。さらに、アルミニウム構造体をエッチング液で溶出することにより、セレン化ヒ素の2次元均一周期構造ならびに不均一部分を有した周期構造を作製した。

【0083】<3次元フォトニック結晶の作製方法>つぎに、本発明にもとづく3次元フォトニック結晶について詳細に説明する。

【0084】[第3の実施形態例] 図17は、本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の一例を説明するためのもので、図17の(a)ないし(d)は各

工程を説明するための模式的断面図である。また、図18はそのような作製方法で使用される型の斜視図である。図17(a)において、型4は2次元方向に沿って周期的に凹凸構造(以下、2次元周期構造ともいう)が形成された一面(該面から垂直な方向からみて格子状に形成された凹凸構造)を有する。すなわち、型4の一面上に矩形状の複数の凸部が格子状に配列している。

【0085】まずはじめに、図17(a)に示すように基板1上に第1の屈折率( $n_1$ )を有する第1の材料からなる薄膜2を積層する。その後、型4(図17(a)参照)を、上記薄膜2の上面に押し当てることで、該薄膜2の表面に上記凹凸構造(以下、2次元周期構造ともいう)を刻印する(図17(b))。この2次元周期構造が形成された薄膜2上に、さらに第2の屈折率( $n_2$ )を有する第2の材料からなる薄膜3を積層する(図17(c))。その後、薄膜2の場合と同様に型4による刻印を行うことで、2次元周期構造を薄膜3の表面に形成する(図17(d))。この際、薄膜2で適用した2次元周期構造とは異なる2次元周期構造を適用することも可能である。このように、屈折率の異なる薄膜2および3をそれぞれ2次元周期構造を形成しながら交互に積層して積層体を形成する。

【0086】図19は、2次元周期構造を有する薄膜2および3が基板上に積層された積層体からなる3次元フォトニック結晶の斜視図である。この図では、2次元周期構造を有する薄膜2および3が基板上に5回にわたって交互に積層されることで3次元の微細周期構造を持つ積層体となっている。

【0087】なお、以下の説明では、1つの薄膜2と1つの薄膜3とを積層することを積層体形成の一周期とする。したがって、例えば第3周期目の積層という場合、すでに2つの薄膜2と2つの薄膜3とが交互に積層して形成された積層体の上に、さらに1つの薄膜2と1つの薄膜3とを積層することをいう。

【0088】つぎに、このような積層体の周期構造中に、周期を乱す不均一な部分を導入する方法について説明する。

【0089】不均一な部分を導入するために、上記積層体を形成する際に、例えば上記2次元周期構造の一部に不均一な部分が設けられた型を使用する。そのような不均一な部分が設けられた型の一例を図20に示す。この図では、複数の凸部がなす格子模様の中に位置する一つの凸部が欠けることで、2次元周期構造の一部に不均一な部分が設けられた型5となる。すなわち、型5は上方向から見て十字形の凹部が不均一な部分として存在する型となる。このような型5によって刻印された積層体の一例を図21に示す。なお、不均一な部分の形状は特定の形に限定されるものでなく、十字形のみならず、円形、矩形、L字形、X形等、実際のデバイス作製に応じて任意の形状が可能である。例えば、L字状に複数の

凸部を取り除くことで不均一な部分が形成された型6を図22に示す。

【0090】図23および図24は、図19の積層体を形成する際に、第5周期目の2次元周期構造をそれぞれ型5および型6を用いて作製した例を示す。図に示すように、積層体の最上層として位置する第2の屈折率を有する薄膜3に不均一な2次元周期構造が形成されている。また、第5周期目のみならず、不均一な部分を有する型を連続して用いることで、垂直方向に不均一な部分が形成された積層体を設けることも可能である。また、図21または図23の積層体の最上層に、さらに6周期、7周期と2次元の均一な周期構造4あるいは不均一な周期構造5または6を積層させることも可能である。

【0091】上述の薄膜形成には、スパッタ法、真空蒸着法、化学的気相成長法等の適用が可能である。そのなかでも、プロセスの簡略化という観点から、ゾルーゲル法を用いた回転塗布法が最も好ましい。ゾルーゲル法は、例えば作花済夫著『ゾルーゲル法の応用』（アグネ承風社刊、1997年）に記述されているように、あらかじめ調整された薄膜原料の溶液あるいは分散液に熱や光を当てて化学反応を引き起こして固化させるものである。この方法では出発材料が液体であるため、回転塗布によって均一な薄膜が得られることや比較的低温でガラス、セラミックス等をはじめとして種々な複合材料の薄膜を容易に得ることができる等の利点がある。また、成分・作製プロセスを適当に制御することによって、柔軟なゲル膜が得られるため、室温で刻印法による微細パターン形成が可能となる。このゾルーゲル法回転塗布膜を用いた刻印法による直接パターン形成では、すでにサブミクロンパターンの溝を持つコンパクトディスク等が作製されており、本発明の目的とする周期構造パターンの解像性は技術的には十分可能な範囲にある。

【0092】一方、刻印には現在コンパクトディスク製造に使用されているような、いわゆるスタンパーと称される装置の利用が可能である。コンパクトディスク製造では、通常一回の刻印で工程が終了するが、本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製に適用する場合、刻印工程を繰り返して行う必要があるので層間の重ね合わせ精度が重要となる。良好なフォトニック結晶を得るためには、重ね合わせ精度は少なくとも $0.05\mu\text{m}$ 以下であることが必要とされる。これには、半導体製造用のリソグラフィ技術、特にX線リソグラフィ技術で用いられた何らかの位置合わせ技術の適用が有望である。X線リソグラフィは、マスクとウエハとを数 $10\mu\text{m}$ に近づけ、マスクパターン寸法をウエハに1対1の比率で転写する等倍露光法であり、型を用いた刻印法も等倍パターン形成であるため、技術的互換性が高い。現在のXステッパの重ね合わせ精度は、 $0.02\mu\text{m}$ 程度であるので、この技術を転用すれば精度 $0.05\mu\text{m}$ 以下で3次元周期構造を積層することが可能である。

【0093】また、型については、現在半導体リソグラフィで行われているフォトマスク、X線マスク作製と同様に、電子線リソグラフィ技術とドライエッチング技術とを用いて作製することが可能である。型用の基板としては、硬く高耐性のものが好ましく、炭化ケイ素、石英、シリコン、二酸化シリコン（熱酸化法、スパッタ法、化学的気相法による）、人造ダイヤモンド、ステンレス、ニッケル、セラミック等からなる基板があげられる。

【0094】〔第4の実施形態例〕図24は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第4の例を説明するためのもので、図24の(a)および(b)は各工程を説明するための模式的断面図である。この実施形態例は、複数の薄膜に対して一回の刻印で3次元周期構造を形成することを特徴とする。したがって、薄膜形成法、刻印に用いる型等については第1の実施形態例と同様なものとすることが可能であることのみならず、フォトニック結晶の作製過程を大幅に簡略化することが可能である。

【0095】以下、本実施形態例の3次元フォトニック結晶の作製方法について説明する。

【0096】まずはじめに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。つぎに、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。さらに、薄膜2および薄膜3を交互に積層して、最終的にそれぞれの薄膜が3層形成された交互積層膜が形成される。

【0097】このように形成された交互積層膜に対して、図24(a)に示すようにして、実施形態例1と同様に図18に示す型を該交互積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。その結果、図24(b)に示すように、薄膜2および薄膜3からなる積層体に3次元周期構造が形成される。

【0098】3次元周期構造への不均一部分の導入は、第3の実施形態例と同様に、型を替えることによって容易に行うことができる。基板と平行に不均一部分を導入する一例を以下説明する。なお、第3の実施形態例と同様に、本実施形態例においても任意の形状を有する型を用いることが可能である。

【0099】まず、3周期積層後の刻印を、図18の均一微細周期構造を有する型4で行う。つぎに、4周期目の第1あるいは第2の屈折率を有する材料の薄膜に対して、例えば図20または図22の型5または6を用いて刻印を行う。その後、再び交互に膜を積層し、図18の型4で刻印することで、任意の層中に不均一部分を形成することができる。

【0100】また、基板と垂直な方向に不均一部分を導入する場合は、3周期積層後の刻印を、例えば図20または図22の型5または6で行う。

【0101】このように、本実施形態例で3次元周期構

造への不均一部分導入は、最小3回の刻印工程を行うことで実現できる。その結果、3次元フォトニック結晶の作製過程を大幅に簡略化することが可能となり、また重ね合わせ精度も大幅に向上させることが可能となる。

【0102】〔第5の実施形態例〕図25は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第5の例を説明するためのもので、図25の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【0103】以下、本実施形態例の3次元フォトニック結晶の作製方法について説明する。

【0104】まずはじめに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。つぎに、図18に示すものと同様の型4を図25(a)に示すようにして積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する(図25(b))。

【0105】2次元周期構造が形成された薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。その後、図18に示す型と同様の微細周期構造を有するとともに、該微細周期構造の周囲に凸状の支柱部を形成する図26の型4b(図25中、符号4')を用いて刻印を行う(図25(c)~(d))。支柱部形成用の型の一例を図26に示す。この型4bは、微細周期構造形成に寄与する凹凸部と、該凹凸部を囲むようにして凹凸部と所定の距離間隔して立設する凸部とからなる。微細周期構造形成に寄与する凹凸部の凸部は、その高さが支柱部形成用の凸部よりも若干低い。支柱部形成用の型によって形成される支柱パターン(すなわち、上記凸部によって刻印される薄膜部分)は、3次元構造の支柱を形成するためのものである。したがって、凸部によって刻印される薄膜部分でできるだけ薄くなることが望ましい。

【0106】つぎに、型4bによる刻印が施された薄膜3上に薄膜2を積層し、図18に示すものと同様の型4で刻印する(図25(e))。

【0107】このようにして形成された積層構造体の中で、第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を除去して空隙とする。これにより、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2と空気とからなる3次元周期構造が形成される。この場合、特に周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型ならびに刻印を制御することが重要である。

【0108】図27は、5周期積層後の3次元積層体構造を示す斜視図である。3次元周期構造中への不均一部分の導入も第1および第2の実施形態例と同様の方法で行うことができる。図28および図29は、不均一部分が導入された場合の例を示す斜視図である。

【0109】〔第6の実施形態例〕図30は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第6の例を説明するためのもので、図30の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【0110】まずはじめに、基板1上に第1の屈折率を

有する材料からなる薄膜2を積層し、図18に示すものと同様の型4で刻印する(図30(a)および(b))。さらに、刻印された薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層して、型4で刻印する(図30(c))。

【0111】上記刻印によって2次元周期構造が形成された積層体上に、さらにレジスト9を塗布し、フォトリソマスク7を通して紫外線8を照射することで第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3の微細構造周辺部を除去する(図30(d))。

【0112】つづいて、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層し、型4で刻印する(図30(e))。

【0113】このようにして形成された積層構造体の中で、第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を除去して空隙とする(図30(f))。これにより、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2と空気とからなる3次元周期構造が形成される。この場合、特に周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型ならびに刻印を制御することが重要である。また、支柱の間隔はフォトニック結晶の特性に影響を与えない距離とすることも重要である。

【0114】5周期積層後の3次元積層体構造は、第3の実施形態例と同様に、図24に示す構造となる。また、3次元周期構造中への不均一部分の導入も第3および第4の実施形態例と同様の方法で行うことができ、第5の実施形態例と同様に、例えば図28および図29に示す構造となる。

【0115】〔第7の実施形態例〕図31は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第7の例を説明するためのもので、図31の(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【0116】まずはじめに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。つぎに、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。さらに、薄膜2および薄膜3を交互に積層して、最終的にそれぞれの薄膜が3層形成された交互積層膜を形成する。

【0117】このように形成された交互積層膜に対して、図18に示す型4を図31(a)に示すようにして該交互積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。その結果、薄膜2および薄膜3に3次元周期構造が形成される(図31(b))。

【0118】つづいて、刻印がなされた積層構造体の最上部にフォトリソマスク7を塗布し、フォトリソマスク7を通して紫外線8を照射することで第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3の微細構造周辺部を除去する。さらに、紫外線照射によってパターン形成された薄膜3をマスクとして、ドライエッチング等の手法を用いて交互積層構造をエッチングする。その後、エッチング部に第1の屈

折率を有する材料2'を埋め込む(図31(c))。

【0119】以上の工程(図31の(a)~(c))を繰り返すことで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。エッチング部の埋め込み材料としては第1の屈折率を有する材料が好ましいが、他の材料を用いることも可能である。

【0120】最後に、上記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分(薄膜3)を除去して空隙とする(図31(d))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形成される。この場合、特に周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型および刻印を制御することが重要である。また、支柱の間隔はフォトニック結晶の特性に影響を与えない距離とすることも重要である。

【0121】5周期積層後の3次元積層体構造は、第5および第6の実施形態例と同様に、図27に示す構造となる。また、3次元周期構造中への不均一部分の導入も第3および第4の実施形態例と同様の方法で行うことができ、第5および第6の実施形態例と同様に、例えば図28および図29に示す構造となる。

【0122】[その他の実施形態例]上記実施形態例で使用された型4の形状を変えることで、種々の3次元周期構造を作製することが可能である。以下、その一例を図面を参照しながら説明する。

【0123】図32は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第6の例を説明するためのもので、図32の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。また、図33はこの方法で適用される型の斜視図である。さらに、図34は、この方法によって作成される3次元積層体構造を示す斜視図である。

【0124】まずはじめに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。

【0125】この薄膜2に対して、図33に示す型4を図32(a)に示すようにして該積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。型4は、上記第1ないし第5の実施形態例のものと、凹凸形状が異なるものを用いる。すなわち、長方形の凸部が複数平行して設けられたものを用いる。つぎに、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する(図32(b))。

【0126】つづいて、薄膜2を積層し、型4を第1回目の刻印とは90度異なる方向に向けて再び刻印を行う(図32(c))。

【0127】さらに、同様にして図32(d)および(e)に示すように、積層と刻印とを繰り返すことで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。

【0128】最後に、上記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分(薄膜3)を除去して空隙と

する(図32(f))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形成される(図34)。

【0129】図35は本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第7の例を説明するためのもので、図35の(a)ないし(e)は各工程を説明するための模式的断面図である。また、図36はこの方法で適用される型の斜視図である。さらに、図36はこの作製方法によって作成される3次元積層体構造を示す斜視図である。

【0130】まずはじめに、基板1上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。

【0131】この薄膜3に対して、図36に示す型4を図35(a)に示すようにして該積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。型4は、上記第1ないし第5の実施形態例のものと、凹凸形状が異なるものを用いる。すなわち、正方形の凸部が複数等間隔に離間して設けられたものを用いる。つぎに、該薄膜2上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する(図35(b))。

【0132】つづいて、薄膜3を積層し、上記の型4による刻印を行う(図35(c))。

【0133】さらに、同様にして図35(d)に示すように、薄膜2を積層することで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。

【0134】最後に、上記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分(薄膜3)を除去して空隙とする(図35(e))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形成される(図37)。

【0135】上記第3ないし第7の実施形態例のいずれかの方法にもとづいて3次元フォトニック結晶を具体的に作製した例を以下に示す。

【0136】[実施例15]第3の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0137】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(以下、PZTと呼ぶ。屈折率は約2.6)と、第2の屈折率を有する材料として酸化ケイ素複合材料(屈折率1.4)とを用い、3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0138】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布することで、該シリコン基板上に0.2 $\mu$ mの薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、炭化ケイ素基板で作製した0.8 $\mu$ m周期構造(0.4 $\mu$ m角正方形パターン、パターン領域2mm)を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 $\mu$ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、



上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、酸化ケイ素複合材料塗布液を約0.2 $\mu$ m回転塗布してホットプレートで熱処理し、上記0.8 $\mu$ m周期構造を有する型を上記酸化ケイ素複合材料の薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 $\mu$ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印工程をそれぞれ10階繰り返すことによって3次元均一周周期構造を作製した。

【0139】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第3の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記のようにして作製した10周期の3次元均一周周期構造上に上述した方法で約0.2 $\mu$ mのPZT薄膜を形成し、0.8 $\mu$ m周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周周期構造を作製した場合と同様に、0.2 $\mu$ mの酸化ケイ素複合材料と0.2 $\mu$ mのPZTとの10周期分の均一周周期構造を形成した。

【0140】[実施例16]第4の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0141】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料として酸化ケイ素複合材料(屈折率1.4)とを用い、3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0142】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 $\mu$ mのPZT薄膜を形成した。つぎに、上記PZT薄膜上に酸化ケイ素複合材料塗布液を適量滴下して回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 $\mu$ mの酸化ケイ素複合材料薄膜を形成した。これを10回繰り返し、10周期分のPZTと酸化ケイ素複合材料との交互積層膜を形成した。その後、実施例1で用いたものと同様な0.8 $\mu$ mの均一周周期構造を有する型を上記の交互積層膜に押し当てて刻印し、ホットプレートで加熱することで交互積層膜を固化した。これによって3次元の均一周周期構造を形成した。

【0143】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第2の実施形態例と同様の作製プロセスに従い、以下のように作製した。まず、上記で作製した3次元均一周周期構造上に上述した方法で約0.2 $\mu$ mのPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた中央部に不均一構造を有する型(図20参照)を押し当てて刻印した後、ホットプレートで加熱処理して固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上記の均一周周期構造を作製

した場合と同様に、0.2 $\mu$ mの酸化ケイ素複合材料と0.2 $\mu$ mのPZTとの10周期分の交互積層膜を形成し刻印して均一周周期構造を形成した。

【0144】[実施例17]第3の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0145】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料として酸化ケイ素複合材料(屈折率1.4)とを用い、3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0146】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布することで0.2 $\mu$ mの薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例1で用いたものと同様な0.8 $\mu$ mの均一周周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 $\mu$ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造体を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約0.2 $\mu$ m回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、上記の0.8 $\mu$ m周期構造を有する型を上記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 $\mu$ mの窪みを持つ2次元周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印工程をそれぞれ10回繰り返すことにより、3次元均一周周期構造を作製した。

【0147】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第1および第2の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のように作製した。まず、上記のようにして作製した10周期の3次元均一周周期構造上に上述した方法で約0.2 $\mu$ mのPZT薄膜を形成し、実施例14で用いた0.8 $\mu$ m周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周周期構造委を作製した場合と同様に、0.2 $\mu$ mのポリイミドと0.2 $\mu$ mのPZTとの10周期分の均一周周期構造を形成した。

【0148】[実施例18]第4の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0149】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0150】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量



滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2  $\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成した。つぎに、上記PZT薄膜上に、ポリイミド塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2  $\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜を形成した。これを10回繰り返して、10周期分のPZTとポリイミドとの交互積層膜を形成した。その後、実施例1で用いたものと同様な0.8  $\mu\text{m}$ の均一周周期構造を有する型を上記の交互積層膜に押し当てて刻印し、ホットプレートで加熱し、交互積層膜を固化した。これにより3次元の均一周周期構造を形成した。

【0151】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第3および第4の実施形態例の作製プロセスに従って、以下のように作製した。まず、上記で作製した3次元均一周周期構造上に上記した方法で約0.2  $\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例14で用いた0.8  $\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周周期構造を有する型を押し当てて刻印した場合と同様に、0.2  $\mu\text{m}$ のポリイミドと0.2  $\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周周期構造を形成した。

【0152】【実施例19】本実施例は、第1の屈折率を有する材料としてチタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド（屈折率約1.5）とを用い、第5の実施形態例にもとづいて3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製したものである。

【0153】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2  $\mu\text{m}$ の薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例14に用いたものと同様な0.8  $\mu\text{m}$ の均一周周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2  $\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約0.2  $\mu\text{m}$ 回転塗布しホットプレートで熱処理し、上記の0.8  $\mu\text{m}$ 周期構造の周辺部に支柱用パターンを有する型を上記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約0.2  $\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元均一周周期構造を形成した。

【0154】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第3および第4の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記のように作製した0.2  $\mu\text{m}$ のPZTと0.2  $\mu\text{m}$ のポリイミドとの10周期の均一周周期構造上に上述した方法で約

0.2  $\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例3で用いた0.8  $\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周周期構造を作製した場合と同様に、0.2  $\mu\text{m}$ のポリイミドと0.2  $\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0155】【実施例20】第6の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0156】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0157】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2  $\mu\text{m}$ の薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例1で用いたものと同様な0.8  $\mu\text{m}$ の均一周周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2  $\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約0.2  $\mu\text{m}$ 回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、上記の0.8  $\mu\text{m}$ 周期構造を有する型を上記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約0.2  $\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元周期構造を形成した。その後、フォトリソを用いて紫外線を照射して現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印、紫外線照射工程をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことにより、ポリイミド層を除去し、PZTの3次元均一周周期構造を形成した。

【0158】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第3および第4の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記のように作製した0.2  $\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例14で用いた0.8  $\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周周期構造を作製した場合と同様に、0.2  $\mu\text{m}$ のポリイミドと0.2  $\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0159】〔実施例21〕第7の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトリソグラフィ結晶の作製を行った。

【0160】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0161】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2μmのPZT薄膜を形成した。つぎに、上記PZT薄膜上に、ポリイミド塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2μmのポリイミド薄膜を形成した。これを10回繰り返して、10周期分のPZTとポリイミドとの交互積層膜を形成した。つぎに、実施例1で用いたものと同様の0.8μmの均一周期構造を有する型を上記の交互積層膜に押し当てて刻印した。ただし、最上層のポリイミド膜については0.2μmではドライエッチング耐性が不十分であったため、刻印・固化後、再度塗布し5μmと厚くした。つぎに、上記交互積層膜にフォトマスクを用いて紫外線を照射し現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱固化した。その後、パターン形成した後、エッチング部にPZT液を埋め込み加熱し固化した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0162】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第1および第2の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記で作製した3次元均一周期構造上に上述の方法で約0.2μmのPZT薄膜を形成し、実施例14で用いた0.8μm周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に、0.2μmのポリイミドと0.2μmのPZTとの10.5周期分（ポリイミドが最上となるように）の交互積層膜を形成し刻印して均一周期構造を形成した。ただし、最上層のポリイミド膜はドライエッチングに耐える厚さとした。つぎに、上記交互積層膜にフォトマスクを用いて紫外線を照射し、現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。その後、パターン形成されたポリイミド薄膜をマスクとして、ドライエッチングで交互積層膜構造をエッチングした後、エッチング部にPZT液を埋め込み加熱し固化した。最後に基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0163】〔実施例22〕第5の実施形態例にもとづく

く作製方法による3次元フォトリソグラフィ結晶の作製を行った。

【0164】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてフォトリソグラフィレジスト（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0165】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2μmの薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例14で用いたものと同様の0.8μmの均一周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2μmの窪みを持つ2次元の周期構造を作製した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、フォトリソグラフィレジスト塗布液を約0.2μm回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、上記の0.8μm周期構造の周辺部に支柱用パターンを有する型を上記のフォトリソグラフィレジスト薄膜に押し当てて刻印し、約0.2μmの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフォトリソグラフィ層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0166】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第1および第2の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記のようにして作製した0.2μmのPZTと0.2μmのフォトリソグラフィレジストとの10周期の均一構造上に上述した方法で、約0.12μmのPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた0.8μm周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に、0.2μmのポリイミドと0.2μmのPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフォトリソグラフィ層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0167】〔実施例23〕第5の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトリソグラフィ結晶の作製を行った。

【0168】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてフォトリソグラフィレジスト（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0169】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量

滴下し回転塗布して $0.2\mu\text{m}$ の薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例1で用いたものと同様な $0.8\mu\text{m}$ の均一周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し深さ約 $0.2\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、上記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、フォトレジスト塗布液（東京応化工業社製）を約 $0.2\mu\text{m}$ 回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、上記の $0.8\mu\text{m}$ 周期構造を有する型を上記のフォトレジスト薄膜に押し当てて刻印し、約 $0.2\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、フォトマスクを用いて紫外線照射し現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。上記の薄膜形成、刻印、紫外線照射工程をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフォトレジスト層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0170】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第1および第2の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のように作製した。まず、上記のようにして作製した $0.2\mu\text{m}$ のPZTと $0.2\mu\text{m}$ のフォトレジストとの10周期の均一周期構造上に上述した方法で約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例14で用いた $0.8\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にして、 $0.2\mu\text{m}$ のポリイミドと $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフォトレジスト層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0171】【実施例24】第7の実施形態例にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。

【0172】ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT（屈折率約2.6）と、第2の屈折率を有する材料としてフォトレジスト（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0173】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適用滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成した。上記PZT薄膜上に、フォトレジスト塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ のフォトレジスト薄膜を形成した。これを10回繰り返して、10周期分のPZTとフォトレジストとの交互積層膜を形成した。つぎに、実施例1で用いたものと同様な $0.8\mu\text{m}$ の均一周

期構造を有する型を上記の交互積層膜に押し当てて刻印した。つぎに、上記交互積層膜にフォトマスクを用いて紫外線照射し現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。ただし、最上層のフォトレジスト膜についてはドライエッチング耐性を持たせるため、刻印、固化後、再度塗布し厚くした。その後、パターン形成されたフォトレジスト薄膜をマスクとして、ドライエッチングで交互積層構造をエッチングした後、エッチング部にPZT液を埋め込み加熱し固化した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことにより、フォトレジスト相違を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0174】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、第1および第2の実施形態例の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、上記で作製した3次元周期構造上に上述した方法で約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた周期構造の中央部に図20で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、上記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にして、 $0.2\mu\text{m}$ のフォトレジストと $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10.5周期分（フォトレジストが最上となるように）の交互積層膜を形成し刻印しての均一周期構造を形成した。ただし、最上層のフォトレジスト膜はドライエッチングに耐えられるように厚くした。次に、上記交互積層膜にフォトマスクを用いて紫外線照射し現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。その後、パターン形成されたポリイミド薄膜をマスクとして、ドライエッチングで交互積層構造をエッチングした後、エッチング部にPZT滴を埋め込み加熱し固定した。最後に基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0175】また、本実施例では第1の屈折率を有する材料として高屈折率のもの、また第2の屈折率を有する材料として低屈折率のものとし、第1の屈折率を有する材料を第1層目として交互積層したが、状況に応じて第2の屈折率を有する材料を第1層目とすることができる。また、必要に応じて基板と第1層目との間に有機膜等の柔らかい膜を導入し、刻印を容易にすることも本発明に含まれる。また、刻印前後の熱処理条件も本実施例のみに限られるのではなく、刻印容易性、膜質向上等の点から適宜変更・追加することができる。また、本実施例では、熱処理をホットプレートで行ったが、半導体プロセスで使用されているような赤外線ランプ方式加熱炉や紫外線照射機構付きホットプレートの利用も可能である。前者の場合は高速処理、後者の場合は低温処理が可能となる。さらに、本実施例では刻印前後の熱処理および刻印工程を室内雰囲気下で、また刻印工程を室温で

行ったが、フォトニック結晶の品質向上の点から、前者については窒素あるいは酸素などの雰囲気下で、また後者については加熱しながら行うことも可能である。

【0176】

【発明の効果】以上説明したように、本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法は、従来のものに比べて2次元フォトニック結晶の作製工程が簡略化され、またデバイス作製に必要な結晶中への不均一部分も容易に行うことが可能であり、その結果超微小光回路やレーザー用共振器等の高性能な光デバイスの実現を可能とする。また、本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法は、従来のものに比べて3次元フォトニック結晶の作製工程が簡略化され、またデバイス作製に必要な結晶中への不均一部分の導入も容易に行うことが可能であり、その結果超微小光回路や超低しきい値レーザー等の高性能な光デバイスへの実現を可能とする。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法の一例を説明するためのもので、(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図2】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法の一例を説明するためのもので、(a)ないし(c)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図3】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の断面模式図である。

【図4】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の断面模式図である。

【図5】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図6】図5に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図7】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図8】図7に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図9】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図10】図9に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図11】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図12】図11に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図13】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図14】図13に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図15】本発明にもとづく2次元フォトニック結晶の作製方法に適用される2次元微細構造を有する構造体の一例の斜視図である。

【図16】図15に示す構造体を用いて形成された2次元周期構造を有する2次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図17】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の一例を説明するためのもので、(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図18】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図19】図18に示す型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図20】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図21】図20に示す型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図22】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図23】図22に示す型を用いて形成された3次元周期構造の一例を示す斜視図である。

【図24】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第2の例を説明するためのもので、(a)および(b)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図25】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第3の例を説明するためのもので、(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図26】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図27】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で形成された3次元微細構造の一例を示す斜視図である。

【図28】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で形成された3次元微細構造の一例を示す斜視図である。

【図29】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法で形成された3次元微細構造の一例を示す斜視

図である。

【図30】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第4の例を説明するためのもので、(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図31】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第4の例を説明するためのもので、(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図32】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第6の例を説明するためのもので、(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図33】図32に示す方法で適用される型の斜視図である。

【図34】図32に示す方法で作成される3次元積層体構造を示す斜視図である。

【図35】本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製方法の第6の例を説明するためのもので、(a)ないし(e)は各工程を説明するための模式的断面図である。

【図36】図35に示す方法で適用される型の斜視図で

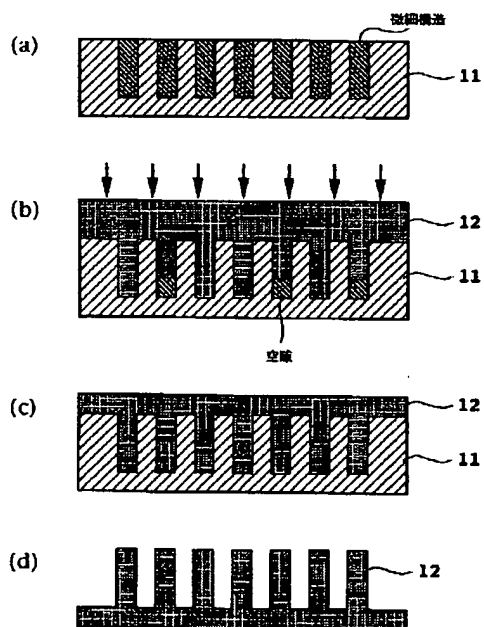
ある。

【図37】図35に示す方法で作成される3次元積層体構造を示す斜視図である。

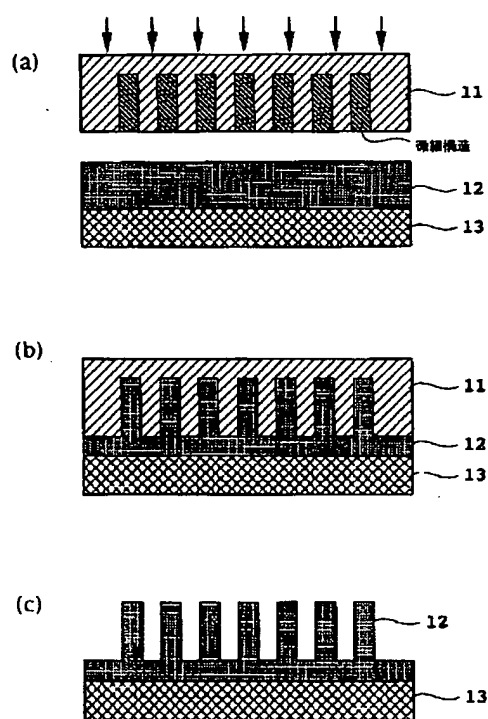
【符号の説明】

- |    |                    |
|----|--------------------|
| 1  | 基板                 |
| 2  | 第1の屈折率を有する材料からなる薄膜 |
| 3  | 第2の屈折率を有する材料からなる薄膜 |
| 4  | 型                  |
| 5  | 型                  |
| 6  | 型                  |
| 7  | フォトマスク             |
| 8  | 紫外線                |
| 9  | レジスト               |
| 11 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 12 | 第1の屈折率を有する材料       |
| 13 | 基板                 |
| 14 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 15 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 16 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 17 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 18 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |
| 19 | 2次元微細構造を有する構造体(基板) |

【図1】



【図2】



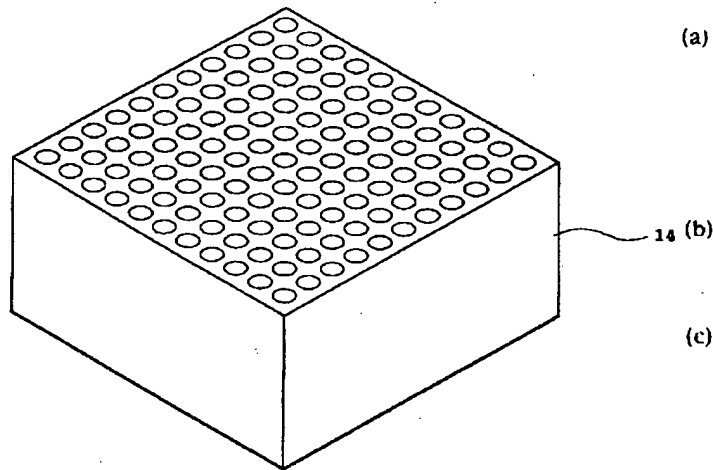
【図3】



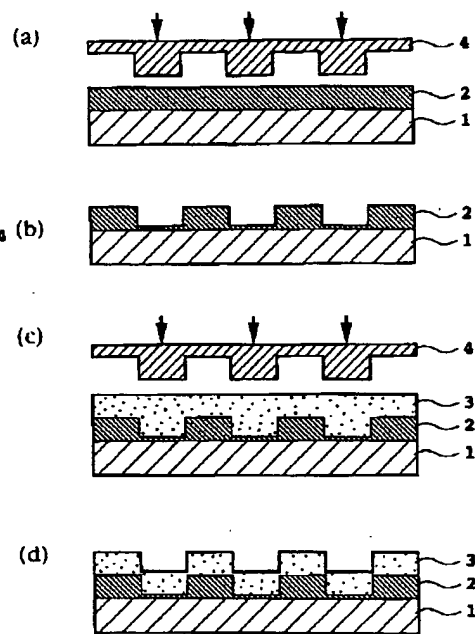
【図4】



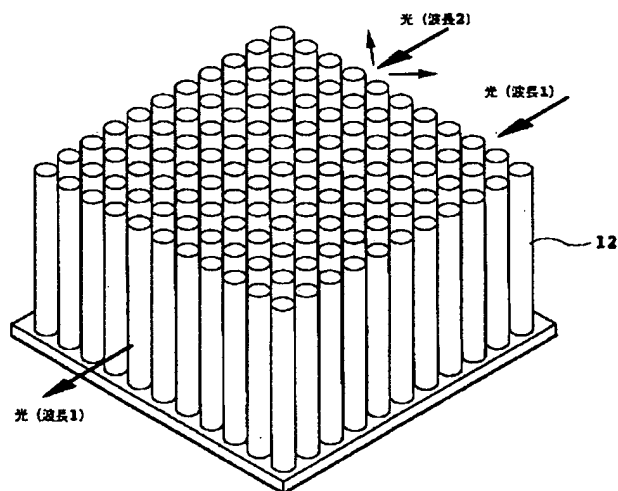
【図5】



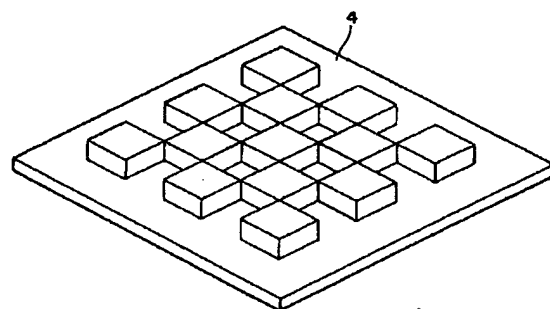
【図17】



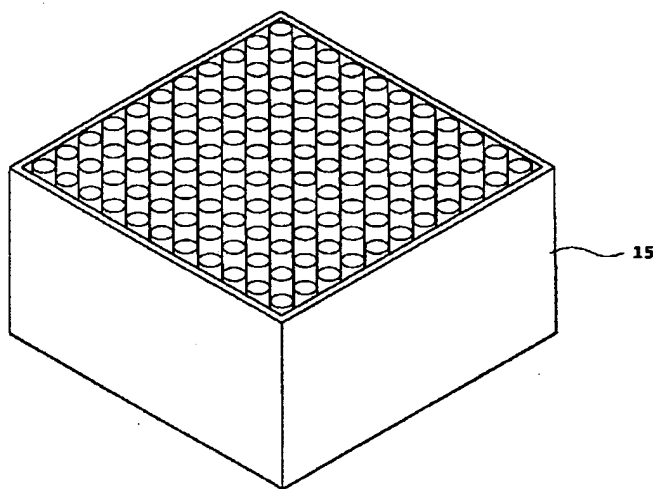
【図6】



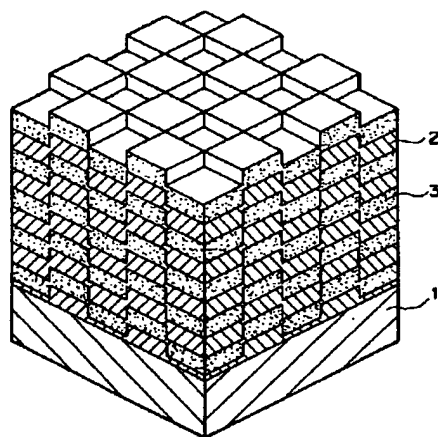
【図18】



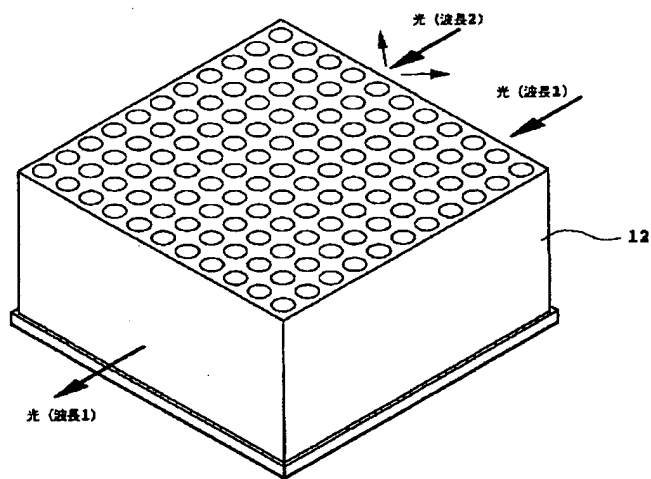
【図7】



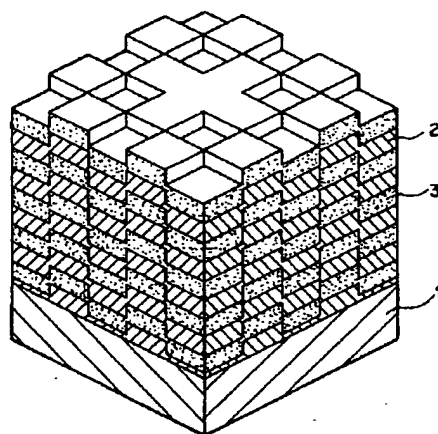
【図19】



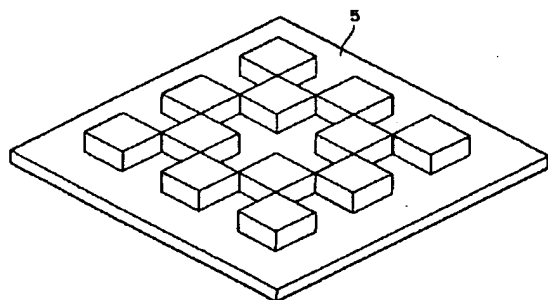
【図8】



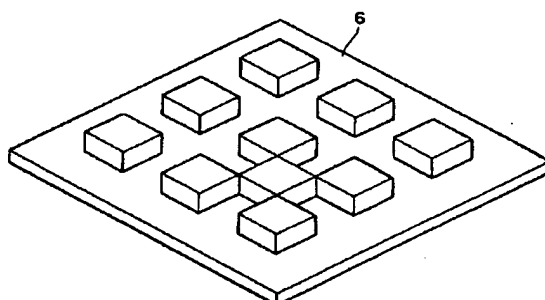
【図21】



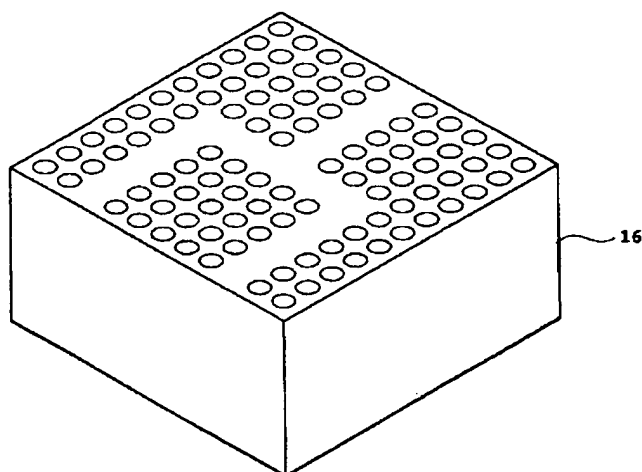
【図20】



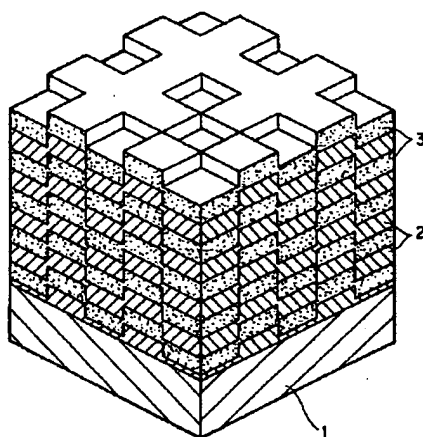
【図22】



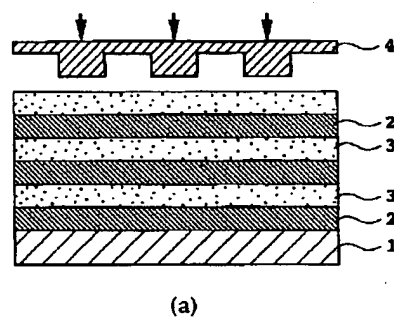
【図9】



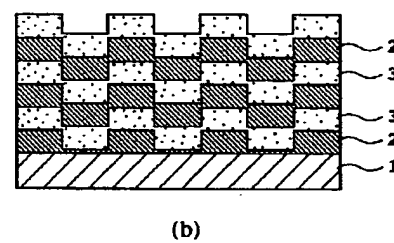
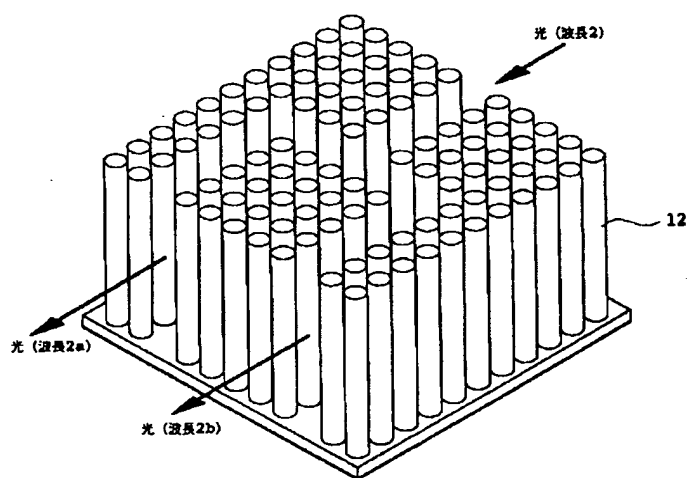
【図23】



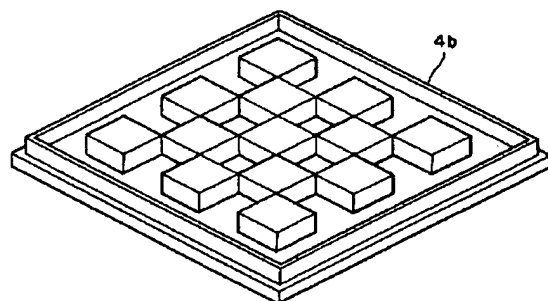
【図24】



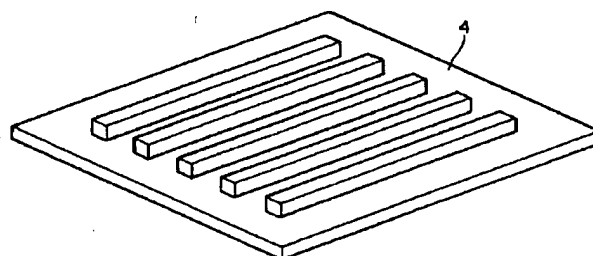
【図10】



【図26】

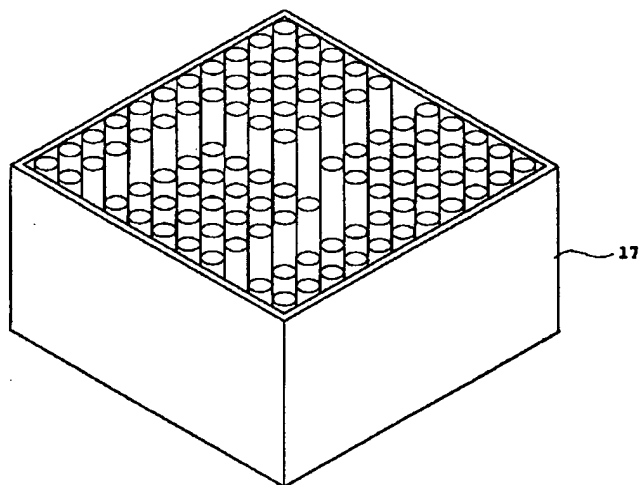


【図33】

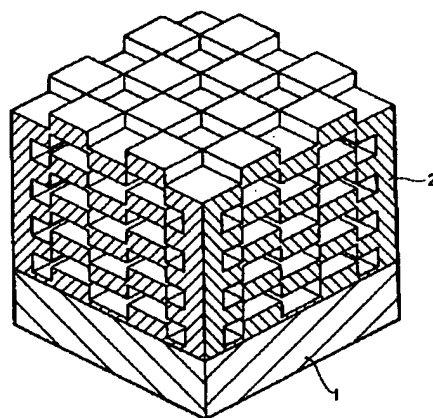




【図11】

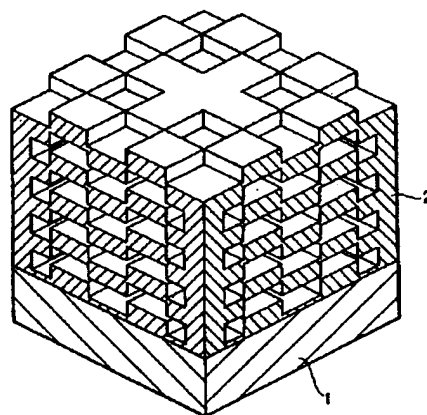
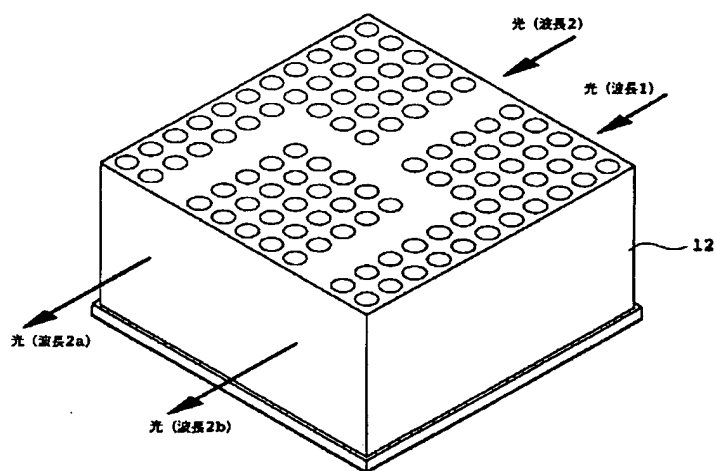


【図27】

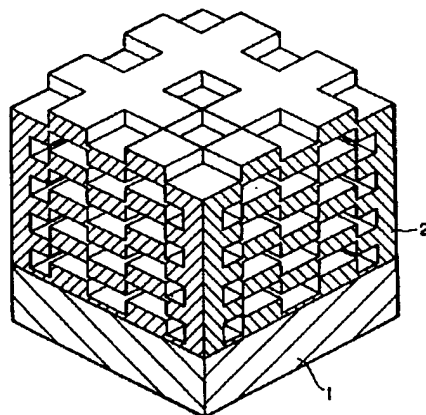


【図28】

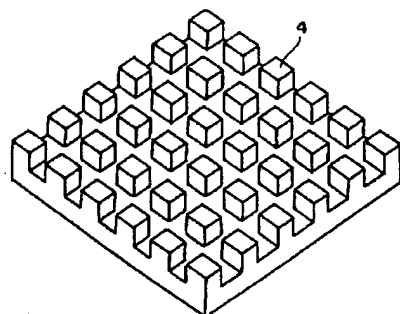
【図12】



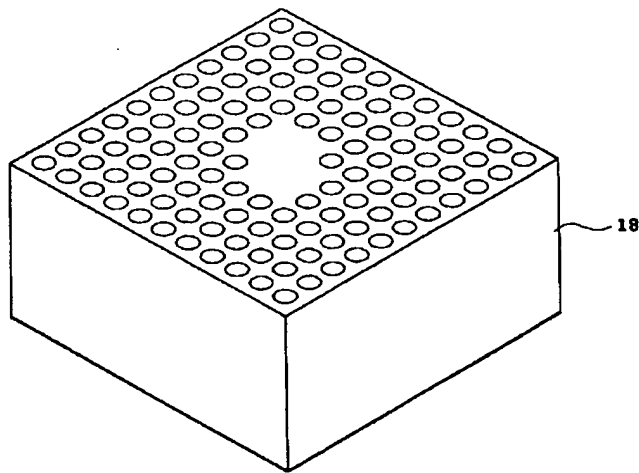
【図29】



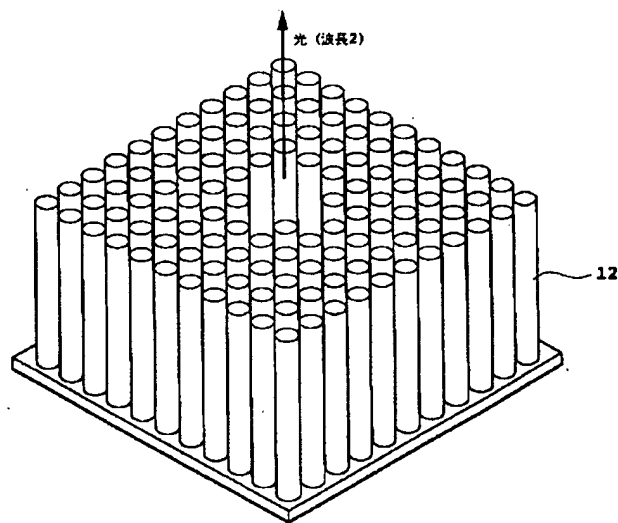
【図36】



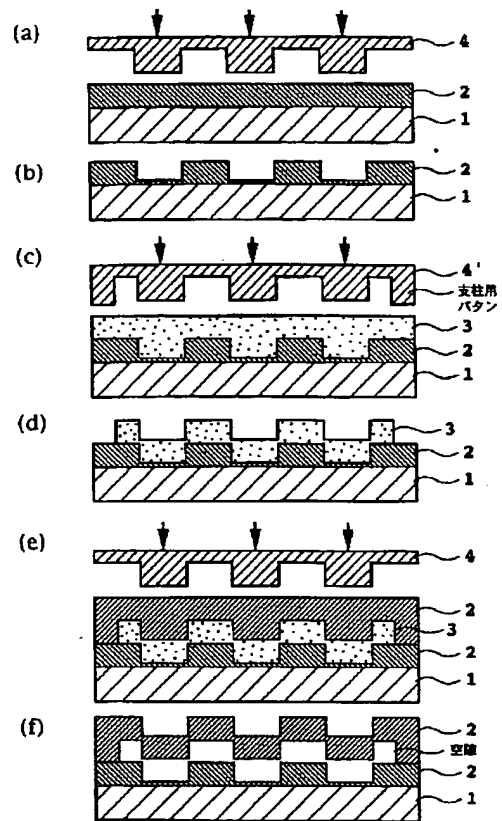
【図13】



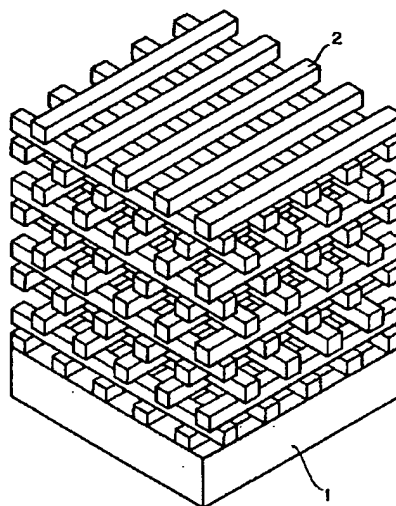
【図14】



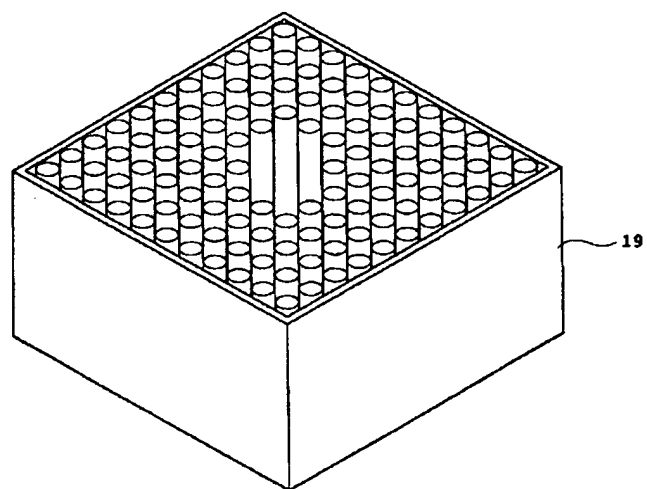
【図25】



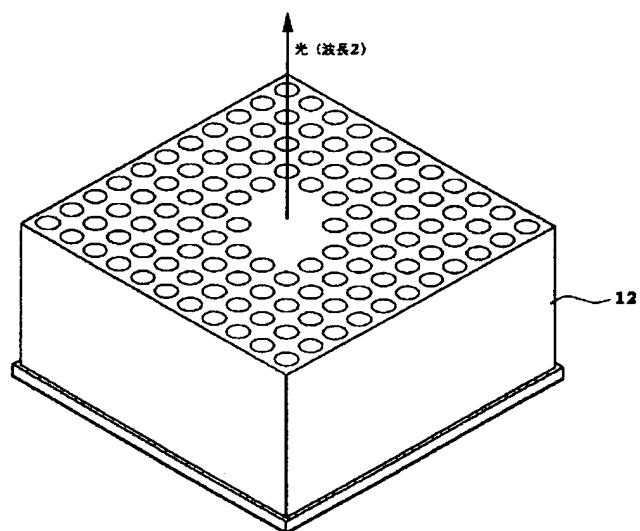
【図34】



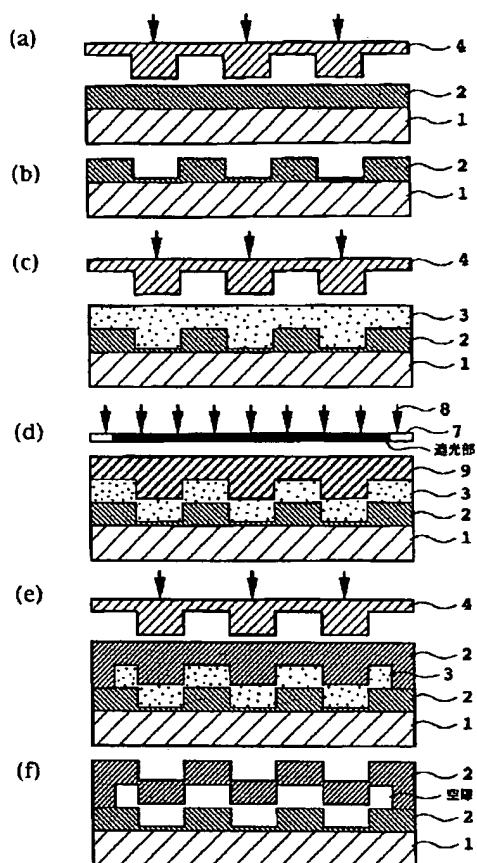
【図15】



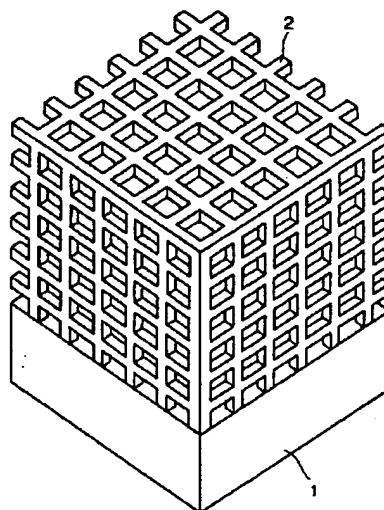
【図16】



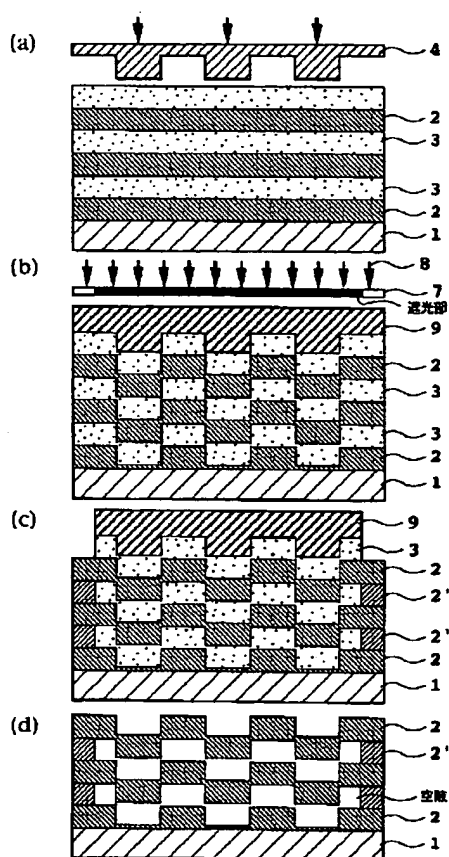
【図30】



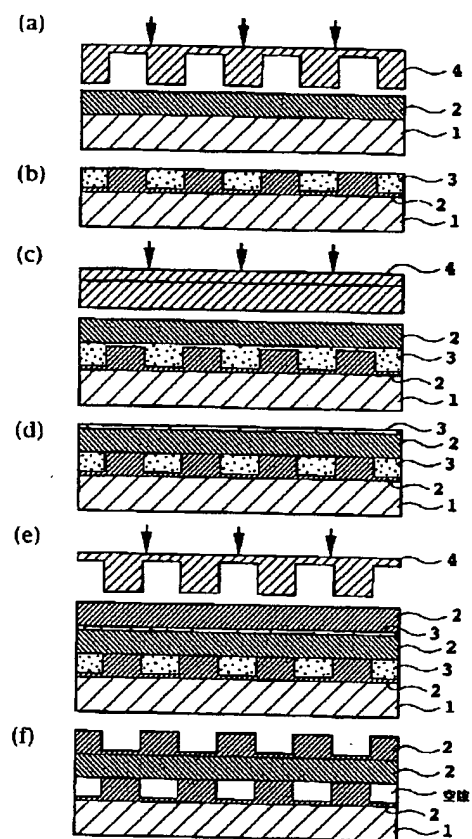
【図37】



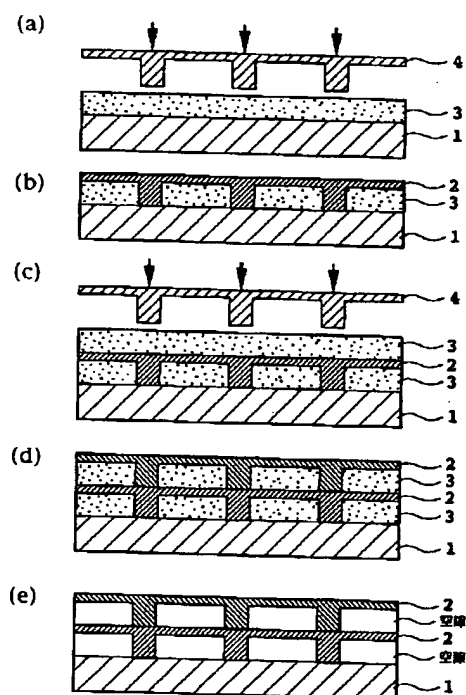
【图31】



【图32】



【図35】



フロントページの続き

(72)発明者 玉村 敏昭  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内

(72)発明者 野澤 博  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内  
Fターム(参考) 2H047 KA00 PA02 PA21 PA24 QA01  
QA04 QA05 TA00 TA43